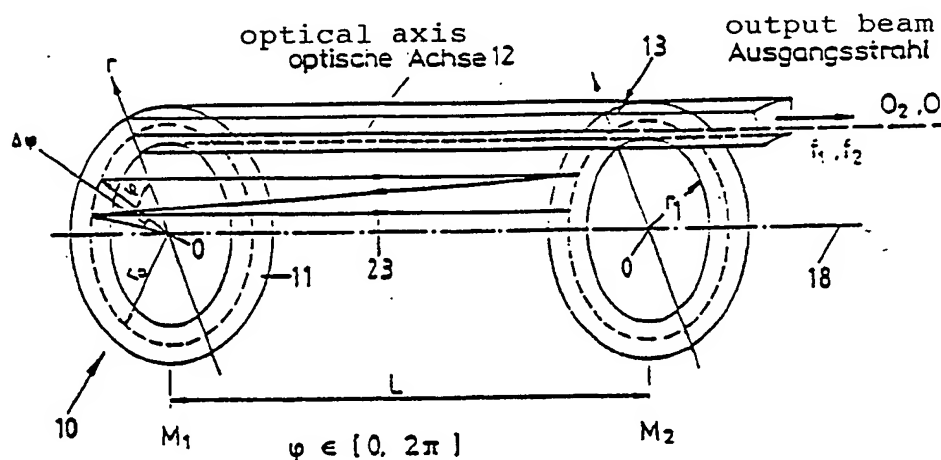


<p>(51) Internationale Patentklassifikation ⁵ : H01S 3/08</p>	<p>A1</p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 92/01322</p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 23. Januar 1992 (23.01.92)</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE91/00568</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 11. Juli 1991 (11.07.91)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: P 40 22 064.8 11. Juli 1990 (11.07.90) DE</p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Leonrodstr. 54, D-8000 München 19 (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und</p> <p>(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): DU, Keming [KR/DE]; Ottostr. 47, D-5100 Aachen (DE). LOOSEN, Peter [DE/DE]; Dorfstr. 25a, D-5100 Aachen (DE). HABICH, Uwe [DE/DE]; Trierer Str. 362, D-5100 Aachen (DE).</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>(74) Anwalt: MÜNICH, Wilhelm; Münich, Steinmann, Schiller, Willibaldstrasse 36/38, D-8000 München 21 (DE).</p> <p>(81) Bestimmungsstaaten: AT (europäisches Patent), BE (europäisches Patent), CH (europäisches Patent), DE (europäisches Patent), DK (europäisches Patent), ES (europäisches Patent), FR (europäisches Patent), GB (europäisches Patent), GR (europäisches Patent), IT (europäisches Patent), JP, LU (europäisches Patent), NL (europäisches Patent), SE (europäisches Patent), US.</p> <p>Veröffentlicht Mit internationalem Recherchenbericht.</p> </div> </div>		

(54) Title: LASER RESONATOR

(54) Bezeichnung: LASERRESONATOR



(57) Abstract

The description relates to a laser resonator with two facing mirrors (M1, M2) and a beam decoupling station (13). According to the invention, the reflective surface of at least one mirror (M1) is so structured that the radiation (23) reflected by it circulates in the azimuthal direction.

(57) Zusammenfassung

Beschrieben wird ein Laserresonator mit zwei einander zugewendeten Spiegeln (M1, M2) und mit einer Strahlauskoppelstelle (13). Erfindungsgemäss ist die Spiegelfläche wenigstens eines Spiegels (M1) derart ausgebildet, dass die von ihr reflektierte Strahlung (23) in azimuthaler Richtung umläuft.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Code, die zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AT	Österreich	ES	Spanien	ML	Mali
AU	Australien	FI	Finnland	MN	Mongolei
BB	Barbados	FR	Frankreich	MR	Mauritanien
BE	Belgien	GA	Gabon	MW	Malawi
BF	Burkina Faso	GB	Vereinigtes Königreich	NL	Niederlande
BG	Bulgarien	GN	Guinea	NO	Norwegen
BJ	Benin	GR	Griechenland	PL	Polen
BR	Brasilien	HU	Ungarn	RO	Rumänien
CA	Kanada	IT	Italien	SD	Sudan
CF	Zentrale Afrikanische Republik	JP	Japan	SE	Schweden
CG	Kongo	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	SN	Senegal
CH	Schweiz	KR	Republik Korea	SU	Soviet Union
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	TD	Tschad
CM	Kamerun	LK	Sri Lanka	TC	Togo
CS	Tschechoslowakei	LU	Luxemburg	US	Vereinigte Staaten von Amerika
DE	Deutschland	MC	Monaco		
DK	Dänemark	MG	Madagaskar		

Laserresonator

B e s c h r e i b u n g

Technisches Gebiet

Die Erfindung bezieht sich auf einen Laserresonator, mit zwei einander zugewendeten Spiegeln und mit wenigstens einer Strahlauskoppelstelle.

Stand der Technik

Derartige Resonatoren, die mit sog. Laser-Endspiegeln versehen sind, und bei denen das im Resonator zwischen den Endspiegeln befindliche Medium angeregt wird, sind allgemein bekannt.

Bei einer Reihe von Lasern sind die beiden Spiegel nicht nur gleichachsig angeordnet, sondern ihre gemeinsame Achse ist zugleich auch die optische Achse des optischen Systems, von der aus sich die Laserschwingung aufbaut. Um einen Ausgangsstrahl des Lasers zu erhalten, ist mindestens einer der Spiegel teildurchlässig ausgeführt, reflektiert also nur einen Teil der auf ihn fallenden Strahlung und läßt den anderen Teil der Strahlung durch; weiterhin ist es bekannt, einen Spiegel mit einem im Vergleich zum anderen Spiegel geringeren Außendurchmesser zu versehen, so daß ein im Querschnitt ringförmiger Ausgangsstrahl gebildet wird.

Wie bereits ausgeführt, wird bei den allgemein bekannten Resonatoren das zwischen den Spiegeln befindliche aktive Medium z.B. durch Pumplicht oder durch Hochfrequenzstrahlung angeregt. Die beim Anregungsprozeß entstehende Wärme muß abgeführt werden.

Hierzu steht bei den Lasern mit Laserresonatoren, bei denen die Achse der beiden Spiegel mit der optischen Achse zusammenfällt, nur der Außenumfang des aktiven Mediums zur Verfügung.

Es ist deshalb mehrfach vorgeschlagen worden, den Laserresonator mit dem aktiven Medium mit einem ringförmigen Querschnitt zu versehen, so daß eine Wärmeabfuhr auch über die innere Begrenzungsfläche möglich ist.

Bei einer kreisring- bzw. annularförmigen Querschnittsbildung des aktiven Mediums sind die verschiedensten Resonatorausbildungen mit zusätzlichen Umlenk- oder Faltungsspiegeln oder mit in Axialrichtung fokussierenden Spiegeln vorgeschlagen worden. Nur beispielhaft wird auf die DE 35 46 152 A1, die DE 35 16 232 C2 oder die DE 38 13 951 A1 verwiesen.

Weiterhin sind Resonatoren mit internen Axicons bekannt. Bei diesen Resonatoren sind die Endspiegel auf der einen Seite des hohlzylindrischen aktiven Mediums angeordnet; auf dessen anderer Seite befindet sich ein Axicon. Letzteres faltet aus dem aktiven Medium auf ihm fallendes Licht U-förmig durch den Hohlraum und durch eine Bohrung eines ringförmigen Resonatorenendspiegels hindurch auf den anderen gleichachsigen angeordneten Endspiegel, der teildurchlässig ist oder einen den Durchmesser des ringförmigen Endspiegels unterschreitenden Außendurchmesser aufweist. Ein solcher Resonator mit internem Axicon hat also für jeden Strahlengangabschnitt eines Laserstrahls vier optische Flächenabschnitte, nämlich zwei an den Endspiegeln und zwei am

Axicon. Alle vier Spiegelflächen müssen extrem genau zueinander justiert werden. Außerdem weisen die Resonatoren eine hohe Empfindlichkeit gegen transversale Verschiebung des Axicons bezüglich der optischen Achse auf.

Die Spaltung der optischen Achse bei diesem Resonator und die relativ große Fresnelzahl führen zum Anschwingen multihöher azimuthaler Moden mit einer schlechten Strahlqualität. Reflexionen infolge der Achsversetzung (off-axis-Reflexionen) verursachen Polarisationsrotation, also Veränderungen der Polarisation in azimuthaler bzw. Umfangsrichtung. Die vorgenannten Justier- und Strahlqualitätsprobleme lassen Resonatoren mit internen Axicons als nicht optimale Lösung erscheinen.

Außerdem sind kreisringförmige bzw. hohlzylindrische Multipass-Resonatoren bekannt. Diese haben außer den beiden Endspiegeln zwei Faltungsspiegel, die derart angeordnet sind, daß der Laserstrahl zickzackförmig oder U-förmig gefaltet durch das hohlzylindrische aktive Medium geschickt wird. Bei derartigen Resonatoren kann zwar die Justierempfindlichkeit durch entsprechende Ausbildung der Spiegel, insbesondere der Faltungsspiegel in erträglichen Grenzen gehalten werden und es ergibt sich auch eine annehmbare Strahlqualität, jedoch wird das aktive Medium nur zum Teil ausgenutzt, weil die Strahlengänge nicht das gesamte zur Verfügung stehende Volumen beanspruchen.

Darstellung der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Laserresonator gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 derart weiterzubilden, daß ein aktives Medium mit insbesondere

annularförmigen bzw. hohlzylindrischem Querschnitt vollständig der Erzeugung von Laserstrahlung ausgenutzt wird, und der Strahl bei geringem Justieraufwand eine gute Qualität hat.

Eine erfindungsgemäße Lösung dieser Aufgabe ist im Anspruch 1 angegeben. Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die Spiegelfläche wenigstens eines Spiegels derart ausgebildet ist, daß die von ihr reflektierte Strahlung in azimuthaler Richtung umläuft.

Bei verschiedenen Ausführungsbeispielen kann der Resonator entweder als Wave-Guide-Resonator ausgebildet sein, oder wenigstens eine Spiegelfläche radial gekrümmt sein. Dabei ist es bevorzugt, wenn die radial gekrümmte Spiegelfläche wenigstens teilringförmig ausgebildet und dort mit einer die Strahlung azimuthal ablenkenden Krümmung versehen ist, und daß die lokalen Neigungen der gekrümmten Spiegelfläche in radialer und azimuthaler Richtung im Sinne des Umlaufs der Strahlung auf der teilringförmigen Spiegelfläche aufeinander abgestimmt sind.

Ein Vorteil der Erfindung ist, daß nur zwei Spiegel benötigt werden, um ein annularförmiges bzw. hohlzylindrisches aktives Medium zumindest auf einem Teil des gesamten Ringumfangs querschnittsmäßig vollständig zum Lasern heranzuziehen. Ein wichtiger Vorteil ist damit, eine Vollvolumendeckung des hohlzylindrischen aktiven Mediums mit nur zwei Spiegeln zu erreichen, also eine hohe Effizienz mit der geringstmöglichen Zahl

justierempfindlicher Spiegel. Desweiteren ist die Justierung bezüglich einer oder mehrerer optischer Achsen unproblematisch, was sich günstig auf die Strahlqualität bzw. auf eine gewünschte Strahlverteilung auswirkt.

Die azimuthale Krümmung der Spiegelfläche bewirkt eine azimuthale Neigung der Strahlung und die Abstimmung der lokalen Neigungen der Spiegelfläche bewirkt den infolge der Ringform erforderlichen Umlauf der Strahlung. Die Abstimmung erfolgt beispielsweise durch Verlagerung der Krümmungszentren, wobei die Größe der Verlagerungen in bekannter Weise experimentell oder rechnerisch ermittelt werden kann.

Wenn man davon ausgeht, daß die durch die azimuthale Krümmung bedingte Ablenkung der Strahlung sehr gering ist, wird der Laserresonator so ausgebildet, daß die azimuthale Krümmung folgender Bedingung genügt:

$$\delta z / \delta r|_{r=r_0} = -c \cdot L / 2r_0^3 (\delta z / \delta \phi|_{r=r_0})^2$$

$z(r, \phi)$	beschreibt die Form der Spiegelfläche in radialer (r) und azimuthaler (ϕ) Richtung,
r	= radialer Koordinate
ϕ	= Azimutwinkel
r_0	= radiale Koordinate des Strahlungskreises
L	= Abstand der Spiegelmittelpunkte
c	= resonatorabhängige Konstante.

Durch Einhalten der oben genannten Beziehung können alle Strahlanteile auf einem Kreis bzw. einem Teilkreis mit dem Radius r_0 umlaufen.

Es ist zweckmäßig, die gekrümmte Spiegelfläche vollringförmig auszubilden, um eine optimale Ausnutzung des gesamten hohlzylindrischen aktiven Mediums zu erreichen. Die dadurch erreichbaren Vorteile sind aber auch dadurch zu erzielen, daß zwei halbringförmige gekrümmte Spiegelflächen beidseitig der optischen Achse angeordnet sind.

Im Bedarfsfall wird der Laserresonator so ausgebildet, daß zwischen den beiden Spiegeln mehrere optische Achsen vorhanden sind, und daß zumindest eine der Anzahl der optischen Achsen entsprechende Anzahl gekrümmter Spiegelflächen vorhanden ist, und daß jeder optischen Achse mindestens eine der Spiegelflächen zugeordnet ist. Mit Hilfe mehrerer optischer Achsen kann insbesondere die gewünschte Strahlverteilung gewährleistet werden, nämlich die Ausbildung von mehreren, der Anzahl der optischen Achsen entsprechenden Laserstrahlen, wenn entsprechend viele Strahlauskoppelstellen vorhanden sind.

Um eine stabile und den praktischen Anforderungen an den Aufbau des Resonators genügende Ausgestaltung zu erreichen, wird der Laserresonator so ausgebildet, daß ein eine Strahlauskoppelstelle aufweisender Spiegel ein geschlossener Ring mit einer die Strahlauskoppelstelle bildenden Aussparung ist. Der geschlossene, insbesondere einstückige Ring sorgt für die gewünschte Stabilität des betreffenden Spiegels und die Aussparung bildet die Strahlauskoppelstelle in baulich einfacher Weise.

Eine Beeinflussung der Strahlqualität ist dadurch möglich, daß zwischen den Spiegeln oder an den Spiegeln die Modenbildung beeinflussende Bauteile vorhanden sind. Die die Modenbildung beeinflussenden Bauteile erlauben es, Moden zu selektieren und demgemäß den Laserstrahl bzw. dessen Qualität an den gewünschten Einsatzzweck anzupassen.

In Anpassung an die Ausgestaltung des die radial gekrümmte Spiegelfläche aufweisenden Spiegels ist der Laserresonator so ausgebildet, daß die Bauteile ringförmig, scheibenförmig oder einen Außenring und eine Innenscheibe aufweisende Modenblenden mit radial nach innen bzw. außen weisenden, die gekrümmte Spiegelfläche azimuthal verteilt abdeckenden Blendenabschnitten sind. Die Blendenabschnitte gestatten es bei entsprechender Anordnung oder bei der Verwendung mehrerer Modenblenden, den gewünschten Mode zu züchten.

Es ist aber auch möglich, den Laserresonator so auszubilden, daß die gekrümmte Spiegelfläche nichtreflektierende und/oder parallel zur optischen Achse vor- oder zurückspringende reflektierende Flächenabschnitte aufweist. Die nichtreflektierenden Flächenabschnitte wirken grundsätzlich wie Modenblenden, da sie optisch nicht aktiv sind. Die vor- oder zurückspringenden Flächenabschnitte sind optisch aktiv, reflektieren also, bewirken jedoch eine konstruktive Interferenz für den gewünschten Mode und eine destruktive Interferenz für alle anderen Moden.

Es ist möglich, daß einer der Spiegel zumindest auf einem Teil seines Umfangs teiltransmissiv (teildurch-

lässig) ist. Bei einer derartigen Ausbildung kann die teiltransmissive Auskoppelstelle vergleichsweise groß gehalten werden, ohne den Auskoppelgrad zu groß zu machen oder das Anschwingen des Lasers zu beeinträchtigen. Der Querschnitt des ausgekoppelten Strahls kann durch Wahl der teiltransmissiven Fläche des Spiegels im gewünschten Sinne beeinflusst werden, um ihn an die durchzuführende Bearbeitung anzupassen. Das ist von besonderer Bedeutung, wenn die Modenbildung beeinflussende Bauteile verwendet werden, die ebenfalls dazu dienen, den Laserstrahl bzw. dessen Qualität an den gewünschten Einsatzzweck anzupassen.

Kurze Beschreibung der Zeichnung

Die Erfindung wird anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigt:

Fig. 1a und b die Abbildung eines ringförmigen Spiegels mit einer in radialer Richtung und in azimuthaler Richtung gekrümmten Spiegelfläche in Rückansicht und im Schnitt,

Fig. 2 eine skizzierte perspektivische Darstellung eines dem Ring der Fig. 1a,d ähnlichen Ringes, jedoch mit erheblich vergrößerten axialen Abweichungen der Spiegelflächenabschnitte,

Fig. 3 eine Abwicklung der Höhe der Spiegelfläche des Spiegels der Fig. 2 auf einem Mittelradius r_0 in azimuthaler Richtung,

Fig. 4 eine schematische Darstellung zur Erläuterung von Berechnungsgrößen für die mathematische Bedingung, unter der die Laserstrahlung auf dem

Kreis r_0 umläuft.

Fig. 5 bis 7 schematische Darstellungen zweier Spiegel für mit in azimuthaler Richtung über unterschiedliche Umfänge umlaufende Laserstrahlung.

Fig. 8 eine eindimensionale Darstellung eines Laserresonators mit nichtlinearer Magnifikation,

Fig. 9a,b,c unterschiedliche Ausbildungen von Modenblenden,

Fig. 10 und 11 Spiegel mit unterschiedlich ausgebildeten modenselektierenden Bauteilen, und

Fig. 12 ein Ausführungsbeispiel mit einer "Wave-Guide".

Die Fig. 1a,b zeigen die konstruktive Ausbildung eines Spiegels M2 eines Laserresonators 10, der in Fig. 5 schematisch dargestellt ist und aus den beiden Spiegeln M1 und M2 besteht, die in einem Abstand L ihrer Spiegelmittelpunkte O voneinander coaxial angeordnet sind. Die Spiegel M1, M2 sind ringförmig ausgebildet und bilden jeweils einen Strahlungskreis mit der radialen Koordinate $r=r_0$. Infolge des ringförmigen Aufbaus der Spiegel M1, M2 wird zwischen ihnen ein annularförmiger bzw. hohlzylindrischer Raum gebildet, der von aktivem Medium eingenommen werden kann, also beispielsweise einem Lasergas für chemische Laser oder für Gaslaser.

Werden für einen derartigen Laser rohrförmige Elektroden zur Hochfrequenzanregung eingesetzt, so wird der Durchmesser der Außenelektrode durch den Außendurchmesser der Spiegel M1, M2 bestimmt und der Durchmesser der Innenelektrode durch den Innendurchmesser der Spiegel

M1, M2. Dieser Innendurchmesser kann gegen null tendieren. Den Raum für den Mittelpunkt O bzw. die die beiden Mittelpunkte O verbindende Achse 18 und den unmittelbar angrenzenden Raum wird man nicht in den Reflexionsraum für Laserstrahlung einbeziehen, da sich hier wegen der speziellen Ausbildung der Spiegelfläche 11 der Spiegel M1, M2 unerwünschte physikalische Erscheinungen beim Laser einstellen. Eine solche Ausbildung der Spiegel M1, M2, also mit gegen null tendierender radialer Koordinate r_i des Innendurchmessers wird auch nur dann angewendet werden können, wenn auf eine Innenkühlung des Raums für das aktive Medium verzichtet werden kann. Insbesondere in diesem Fall ist es auch möglich, die Spiegel als Scheiben auszubilden, von denen mindestens eine die spezielle, nachfolgend beschriebene Spiegelfläche aufweist. Praktisch dürfte der Einsatz einer solchen vollen Scheibe insbesondere dann sein, wenn der Spiegel M2 unter Berücksichtigung des Resonatortyps als Scheibe mit planer Spiegelfläche ausgebildet werden kann.

Die Spiegel M1, M2 des Resonators 10 besitzen in besonderer Weise ausgebildete Spiegelflächen 11. Sie sind in radialer Richtung gekrümmt, also in Richtung der radialen Koordinate r , und sie sind in azimuthaler Richtung gekrümmt, also in Richtung des Azimutwinkels ϕ . Die in Richtung der Mittelachse gegebene Erstreckung der Spiegelflächen 11 ist demgemäß $z = f(r, \phi)$. Diese axiale Erstreckung z bzw. die radiale und die azimuthale Krümmung muß so gestaltet sein, daß die Laserstrahlung auf einem Kreis mit dem mittleren Radius r_0 umläuft. In dieser Strahlungsbahn ist eine Strahlauskoppelstelle 13 vorhanden.

Anhand von Fig. 4 wird die Bedingung abgeleitet, welcher die axiale Erstreckung $z(r, \varphi)$ genügen muß, damit der Laserstrahl bzw. die Laserstrahlung auf den Spiegeln M1, M2 mit dem Radius r_0 umläuft. Es ergibt sich ersichtlich:

$$|\vec{r}_2| = |\vec{r}_1 + \delta\vec{\varphi} + \delta\vec{r}| = r_0 \quad (1)$$

Diese Bedingung muß also erfüllt sein, um die Strahlung auf einen Kreis mit dem Radius r_0 zu zwingen. In dieser Beziehung sind $\delta\vec{\varphi}$ und $\delta\vec{r}$ die Tangential- bzw. Radialkomponenten, des nicht dargestellten Verbindungsvektors zwischen \vec{r}_1 und \vec{r}_2 . Für diese Komponenten gilt:

$$\delta\vec{\varphi} = L \vec{\alpha}_{\varphi} \quad \delta\vec{r} = L \vec{\alpha}_r \quad (1a)$$

In den Gleichungen (1a) sind $\vec{\alpha}_{\varphi}$ und $\vec{\alpha}_r$ die azimuthalen bzw. radialen Winkelkomponenten eines Projektionsstrahls 19 vom Additionspunkt 20 der Komponenten $\delta\varphi$ und δr zur Projektion der Spitze 21 auf den Spiegel M1. Wenn der Winkel $\Delta\varphi$ zwischen \vec{r}_1 und \vec{r}_2 sehr klein ist, also zahlreiche Reflexionen zwischen M1 und M2 stattfinden, gilt:

$$\delta\varphi \ll r_0 \quad \delta r \ll r_0 \quad (2)$$

Damit folgt aus (1) und (1a) näherungsweise:

$$\alpha_r = - L \alpha_\phi^2 / 2r_0 \quad (3)$$

In Fig. 4 ist durch die mit den Pfeilen 23 versehenen Linien der Strahlungsverlauf zwischen den Spiegeln M1, M2 angegeben. Dieser Strahlungsverlauf gilt im Prinzip für jeden unendlich kleinen Bereich der Spiegelfläche 11. Der mathematische Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Strahlung gemäß den Pfeilen 23 und den lokalen Neigungen der Oberfläche ist bezüglich des Strahls 22 unter Heranziehung der Winkelkomponenten α_r und α_ϕ durch die partiellen Ableitungen $\partial z / \partial r$ und $\partial z / \partial \phi$ der Oberflächenfunktion $z(r, \phi)$ gegeben. Es bestehen die folgenden Zusammenhänge:

$$\alpha_r = c * \partial z / \partial r \mid_{r=r_0} \quad (4)$$

$$\alpha_\phi = c * \partial z / \partial \phi \mid_{r=r_0} / r_0 \quad (5)$$

c ist eine vom Resonator abhängige Konstante, für stabile Resonatoren ist $c = 1$, für konfokale instabile Resonatoren gilt $c = 2$, für allgemeine instabile Resonatoren ist c eine Funktion der Magnifikation und der Resonatorlänge.

Bei Einsetzen von (4) und (5) in (3) ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\partial z / \partial r \mid_{r=r_0} = -c * L / 2r_0^3 (\partial z / \partial \phi \mid_{r=r_0})^2 \quad (6)$$

Wenn die Neigungen der Spiegeloberfläche in r - und ϕ -Richtung nach der Beziehung (6) zusammenhängen, läuft der Strahl auf einem Kreis mit dem Radius r_0 um.

Zur Verdeutlichung der grundsätzlichen räumlichen Ausgestaltung der Spiegelfläche 11 wird die schematische Darstellung der Fig. 2 herangezogen, die einen ringförmigen Spiegel M2 mit einem Schlitz als Strahlauskoppelstelle 13 zeigt. Der Ring hat eine bei vertikalem Einbau vertikale Rückseite 24, die gemäß Fig. 1a,b ausgebildet sein kann, also mit Stiften 25 versehen sein kann, um den Spiegel M2 an einer Justiereinrichtung eines Gehäuses zu befestigen. Der Rückseite 24 axial gegenüber ist an der anderen Stirnseite die Spiegelfläche 11 angeordnet. Sie ist radial, aber auch azimuthal gekrümmt. Die radiale Krümmung ergibt sich insbesondere aus der Kante 26. Die azimuthale Krümmung ergibt sich aus der Darstellung der Fig. 2 in Verbindung mit Fig. 3. An der Stelle $\phi = 0$ ist die Höhe h des Spiegels M2 = h_{\max} . In beiden azimuthalen Richtungen ϕ verringert sich die Höhe h gemäß Fig. 3 nach der Beziehung:

$$\begin{aligned} h &= h_{\max} - (r_0 \cdot \phi)^2 / 2R \\ &= h_{\max} - s^2 / 2R \end{aligned}$$

wobei $s = r_0 \cdot \phi$ gilt und die abgewinkelte Länge des ringförmigen Spiegels M2 ist. Bei der praktischen Ausgestaltung des Spiegels M2 ist zu berücksichtigen, daß der radiale Krümmungsradius R vergleichsweise groß ist, so daß die Höhe h_{\max} und die Höhe h in der Nähe der

Strahlauskoppelstelle 13 vergleichsweise gering ist. R liegt in der Größenordnung von 10 bis 20 m.

Für die aus der Fig. 1b ersichtliche Verlagerung des Radiusmittelpunktes P für die Krümmungsradien R in radialer Richtung ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$\delta_1 = c_1 * \varphi^2$$

$$\delta_2 = c_2 * \varphi^2 + c_3 * \varphi^4$$

wobei c_1 bis c_3 resonatorabhängige Konstanten sind. Aus den Beziehungen ergibt sich, daß die Verlagerungen des Radiusmittelpunktes P für die Krümmungsradien R umso größer sind, je größer der Winkel φ ist, was beispielsweise bei der Abstimmung der lokalen Neigungen der Spiegelfläche 11 zu berücksichtigen ist.

Anhand der Fig. 5 bis 7 wird erläutert, wie die Laserstrahlung zwischen den Spiegeln M1, M2 reflektiert und ausgekoppelt wird. Der Umlaufbereich der Laserstrahlung wird durch den für φ angegebenen Bereich gekennzeichnet. Gemäß Fig. 6 läuft die Laserstrahlung also zwischen 0 und π um, d.h. um 180°. Das entspricht Fig. 2, wo die Laserstrahlung von 0 aus infolge der in jeder azimuthalen Richtung abfallenden Spiegelfläche 11 zur Auskoppelstelle 13 hin abgelenkt wird. Diese Ablenkung erfolgt ausgehend von der durch die Nullposition verlaufende optische Achse 12 zwischen zwei Spiegeln M1, M2. Der durch die Pfeile 23 gekennzeichnete Strahlungsverlauf ist aus Fig. 6 ersichtlich. Die Strahlung verläuft also in beiden mit s bzw. φ gekennzeichneten

Richtungen zur Auskoppelstelle 13, um dort den ausgekoppelten Laserstrahl 26 zu bilden.

In Abweichung vom vorbeschriebenen läuft die Laserstrahlung gemäß Fig. 5 im Bereich von $\varphi = 0$ bis $\varphi = 2\pi$ um, d.h. um 360° . Es ist eine in nur einer einzigen azimuthalen Richtung geneigte Spiegelfläche 11 vorhanden, bei der die Höhe h von 0 aus gemäß Fig. 3 nur in Richtung $+s$ verläuft. Die Ausbildung des Spiegels ist wendelartig, so daß man bei den in Rede stehenden Spiegeln mit ring- oder teilringförmigen Spiegelflächen auch von Wendelspiegeln sprechen kann.

Der Resonator 10 der Fig. 7 hat zwei optische Achsen 12 und zwei Auskoppelstellen 13, die so angeordnet sind, daß Strahlung im Bereich von $\varphi = 0$ bis $\varphi = \pi/2$ verläuft. Das aus den Fig. 2, 3 veranschaulichte Profil bzw. dessen Krümmungen sind also über den Umfang von 360° der Spiegel M1, M2 der Fig. 9 doppelt vorhanden. Es entstehen zwei Laserstrahlen 26.

Fig. 8 zeigt einen abgewickelten Schnitt durch die Spiegel M1, M2 auf dem Kreis mit dem Radius r_0 . Diese Abwicklung veranschaulicht die Krümmung der Spiegelflächen 11 in beiden, von der optischen Achse 12 ausgehenden azimuthalen Richtungen. Infolge der Auskoppelstelle 13 ist die Abwicklung des Spiegels M2 kürzer. Der azimuthale Krümmungsverlauf der Spiegel M1, M2 zeigt, daß es möglich ist, Resonatoren mit nichtlinearer Magnifikation auszubilden.

Für den Resonator 10 der Fig. 8 gilt ebenso, wie für alle vorbeschriebenen und weiteren Resonatoren mit den vorbeschriebenen kennzeichnenden Merkmalen, daß sie

durch entsprechende Auswahl der Krümmungen der Spiegel-
flächen 11 ihrer Spiegel M1, M2 entweder instabil oder
stabil ausgebildet werden können, wie auch kofokal oder
nichtkonfokal. Die zutreffende Auswahl hängt jeweils
von dem zu berücksichtigenden Einsatz der Laserstrah-
lung ab.

Beim Einsatz der Laser bzw. der Laserstrahlung ist von
Bedeutung, daß die Laserstrahlung die gewünschten Moden
aufweisen soll. Beispielsweise soll der Hermiteische
Mode gezüchtet werden, also der Grundmode, der sich
beispielsweise dadurch auszeichnet, daß der Laserstrahl
mit einem derartigen Mode am stärksten fokussiert wer-
den kann.

Die Fig. 9a bis 9c zeigen Bauteile zur Beeinflussung
der Modenbildung der Laserstrahlung und sind als Moden-
blenden 14 ausgebildet. Die Modenblende 14 der Fig. 9a
ist ringförmig und hat nach innen weisende Blendenab-
schnitte 15, welche die Spiegelfläche 11 teilweise
abdecken. Die Verteilung der Blendenabschnitte 15 in
azimutaler Richtung ergibt sich entsprechend den Anfor-
derungen an die auszubildenden Moden. Dasselbe gilt für
die radial nach außen weisenden Blendenabschnitte 15
der scheibenförmigen Bodenblende 14 der Fig. 9b und für
die Blendenabschnitte 15 der Modenblende 14 der Fig.
9c. Letztere Modenblende 14 besteht aus einem Außenring
14' und einer Innenscheibe 14'', die durch die Blendenab-
schnitte 15 zu einer Baueinheit miteinander verbunden
sind. Sämtliche Modenblenden 14 bestehen beispielsweise
aus Blechscheiben.

Modenblendenstrukturen können auch direkt auf die Spie-
gelfläche 11 aufgebracht werden. Fig. 10 zeigt einen

Spiegel M1 in schematischer Darstellung mit in azimuthaler Richtung verteilten nicht optischen Flächenabschnitten 16. Die Flächenabschnitte 16 reflektieren also nicht, so daß infolgedessen die Ausbildung der Laserstrahlung im Sinne einer Modenselektion beeinflußt werden kann. Die Flächenabschnitte 16 reflektieren beispielsweise diffus oder absorbieren die Laserstrahlung. Fig. 11 zeigt eine der Fig. 10 entsprechende Darstellung eines Spiegels M1, jedoch mit in azimuthaler Richtung verteilten Flächenabschnitten 17, die optisch wirksam sind. Sie sind jedoch gemäß Fig. 11 in axialer Richtung vorspringend angeordnet, können jedoch auch rückspringend angeordnet werden. In beiden Fällen ergibt sich ein Höhenunterschied δ von z.B. $\lambda/4$, wobei λ die Wellenlänge des Laserlichts ist. Dementsprechend wird die Resonatorlänge geändert und es bilden sich Interferenzschwingungen aus, die so bestimmt werden können, daß der gewünschte Mode angeregt und unerwünschte Mode gedämpft werden.

Die Strahlqualität des ausgekoppelten Strahls mit einem monohermitem Mode kann durch geeignete Phasentransformationen erhöht werden.

Fig. 12 zeigt ein Ausführungsbeispiel der Erfindung, mit einem Wave-Guide-Resonator mit einem ringförmigen Querschnitt. Hierzu sind die Innenfläche 101 der beispielsweise aus Al_2O_3 bestehenden Außenelektrode A und die Außenfläche 102 der Innenelektrode I, die den Resonator einschließen, als reflektierende Flächen mit optischer Qualität ausgeführt.

Der Endspiegel M1 ist bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsge-

dankens direkt auf der Innenelektrode I aufgebracht, während der Endspiegel M2 ein Wendelspiegel ist, der über eine Mikrometerschraube 103 justierbar ist.

Mit K ist der gekühlte Innenraum, über den ein Teil der umgesetzten Leistung abgeführt wird, und mit Ö die Öffnung bezeichnet, durch die der Laserstrahl ausgekoppelt wird.

Vorstehend ist die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens beschrieben worden.

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Laserresonator (10), mit zwei einander zugewendeten Spiegeln (M1,M2) und mit wenigstens einer Strahlauskoppelstelle (13),
dadurch gekennzeichnet, daß die Spiegelfläche (11) wenigstens eines Spiegels derart ausgebildet ist, daß die von ihr reflektierte Strahlung in azimuthaler Richtung umläuft.
2. Laserresonator nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß der Laserresonator (10) einen ringförmigen Querschnitt hat.
3. Laserresonator nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens einer der Spiegel eine radial gekrümmte Spiegelfläche (11) aufweist.
4. Laserresonator nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, daß die Grenzflächen des Lasermediums reflektierend ausgebildet sind, so daß ein Wave-Guide-Resonator gebildet wird.
5. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, daß die die Strahlung in azimuthaler Richtung ablenkende Spiegelfläche teilringförmig ausgebildet und dort mit einer die Strahlung azimuthal ablenkenden Krümmung versehen ist, und daß die lokalen Neigungen der gekrümmten Spiegelfläche in radialer und azimuthaler Richtung im Sinne des Umlaufs der Strahlung auf der teilringförmigen Spiegelfläche aufeinander abgestimmt sind.

6. Laserresonator nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Steigung in Radialrichtung und in Azimutrichtung folgende Beziehung besteht:

$$\delta z / \delta r |_{r=r_0} = -c * L / 2r_0^3 (\delta z / \delta \phi |_{r=r_0})^2$$

$z(r, \phi)$ beschreibt die Form der Spiegelfläche in radialer (r) und azimuthaler (ϕ) Richtung,

r = radialer Koordinate

ϕ = Azimutwinkel

r_0 = radiale Koordinate des Strahlungskreises

L = Abstand der Spiegelmittelpunkte

c = resonatorabhängige Konstante.

7. Laserresonator nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die gekrümmte Spiegelfläche (11) vollringförmig ausgebildet ist.

8. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß zwei halbringförmige gekrümmte Spiegelflächen (11) beidseitig der optischen Achse angeordnet sind.

9. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den beiden Spiegeln (M1, M2) mehrere optische Achsen (12) vorhanden sind, und daß zumindest eine der Anzahl der optischen Achsen (12) entsprechende Anzahl gekrümmter Spiegelflächen (11) vorhanden ist, und daß jeder optischen Achse (12) mindestens eine der Spiegelflächen (11) zugeordnet ist.

10. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein eine Strahlauskoppelstelle (13) aufweisender Spiegel (11) ein geschlossener Ring mit einer die Strahlauskoppelstelle (13) bildenden Aussparung bzw. einem Loch ist.
11. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Spiegeln (M1, M2) oder an den Spiegeln (M1, M2) die Modenbildung beeinflussende Bauteile vorhanden sind.
12. Laserresonator nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Bauteile ringförmig, scheibenförmig oder einen Außenring (14') und eine Innenscheibe (14'') aufweisende Modenblende (14) mit radial nach innen bzw. außen weisenden, die gekrümmte Spiegelfläche (11) azimuthal verteilt abdeckenden Blendenabschnitten (15) sind.
13. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die gekrümmte Spiegelfläche (11) nichtreflektierende und/oder parallel zur optischen Achse (12) vor- oder zurückspringende reflektierende, azimuthal verteilte Flächenabschnitte (16, 17) aufweist.
14. Laserresonator nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß einer der Spiegel (M1, M2) zumindest auf einem Teil seines Umfangs teiltransmissiv ist.

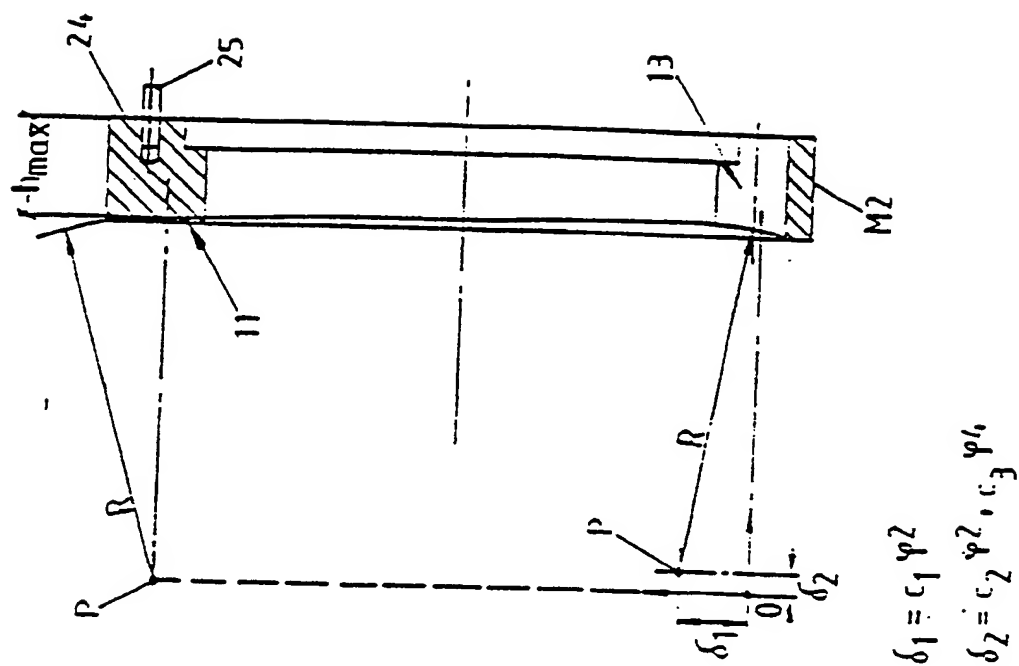


Fig. 1b

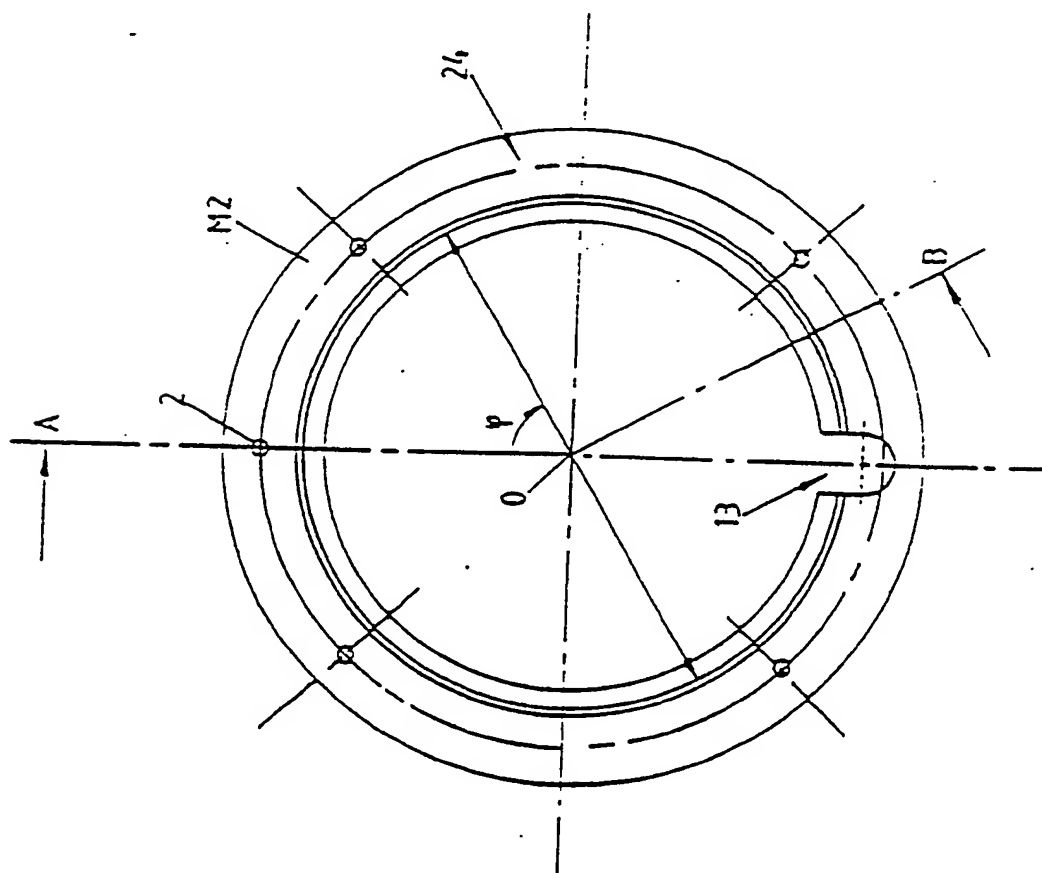


FIG. 1a.

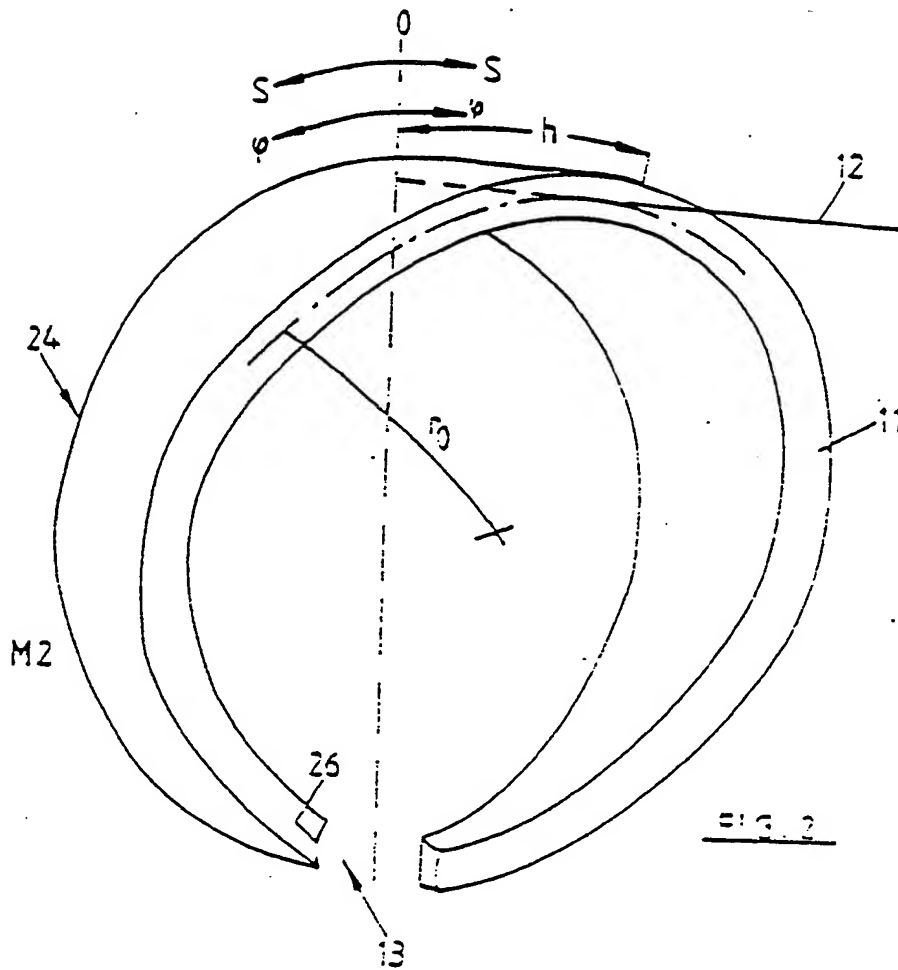


FIG. 2

$$h = h_{\max} - \frac{(r_0 \varphi)^2}{2R}$$

$$= h_{\max} - \frac{S^2}{2R}$$

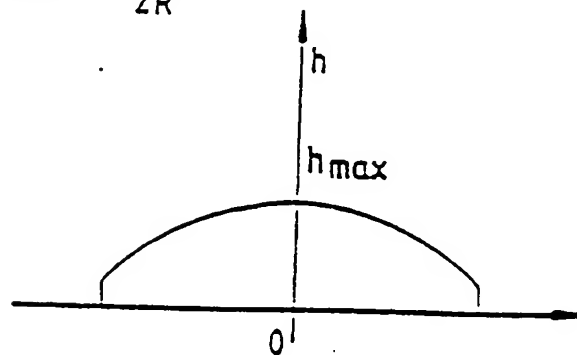
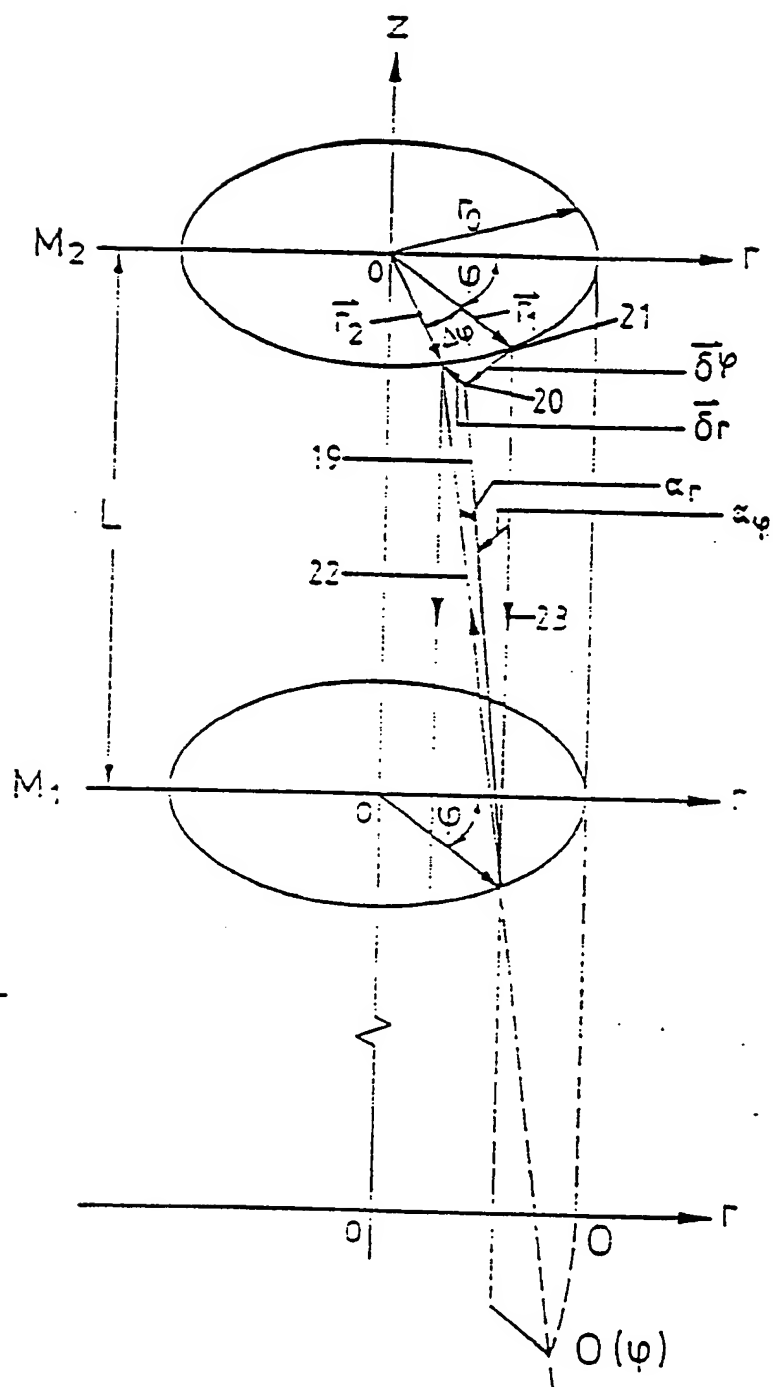


FIG. 3



715.4

FIG. 5

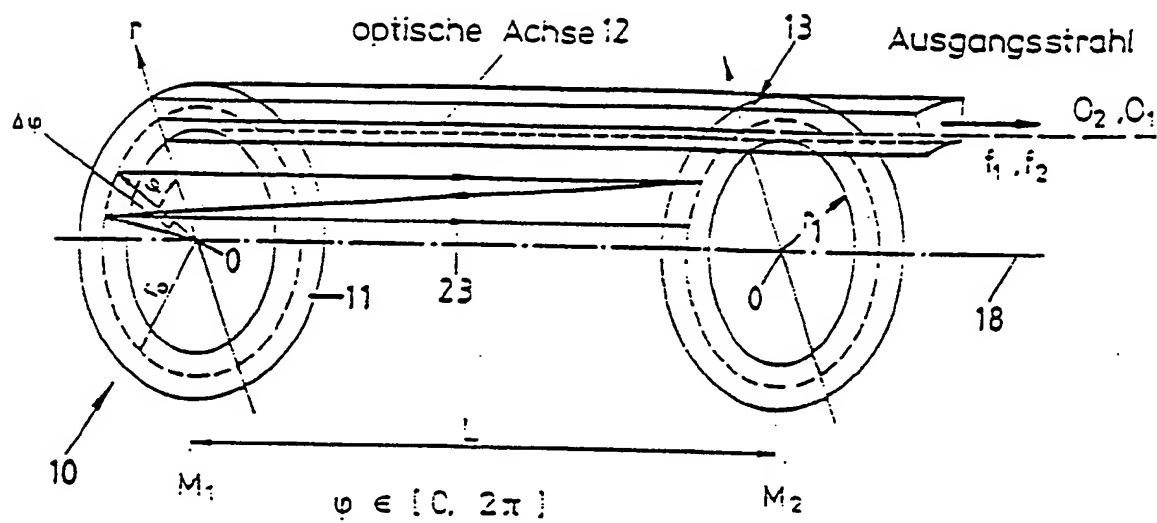


FIG. 6

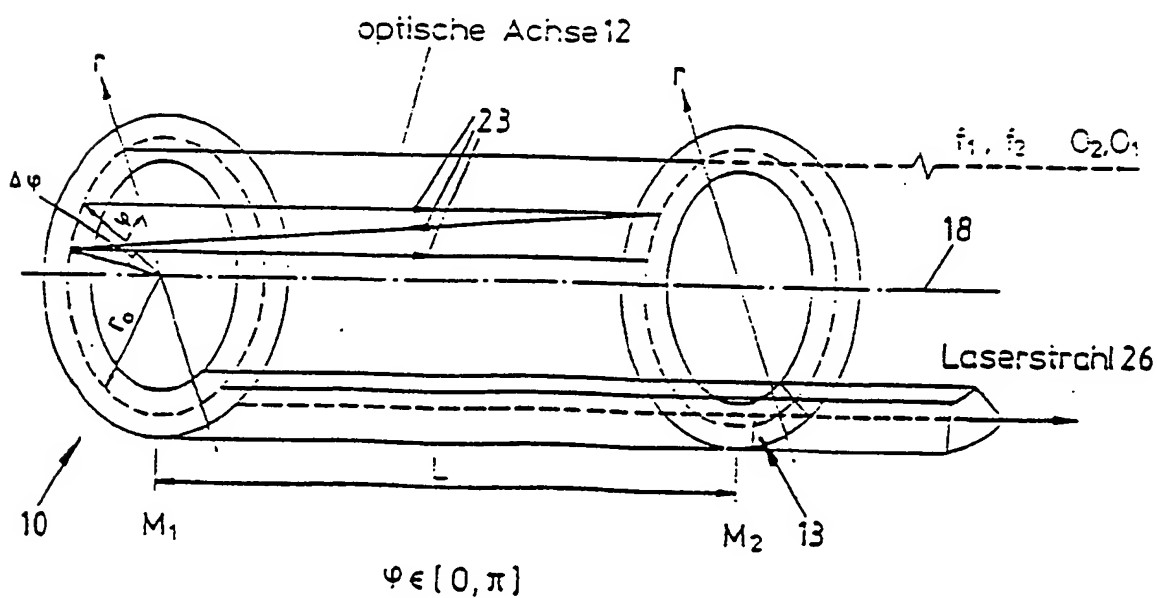


FIG. 7

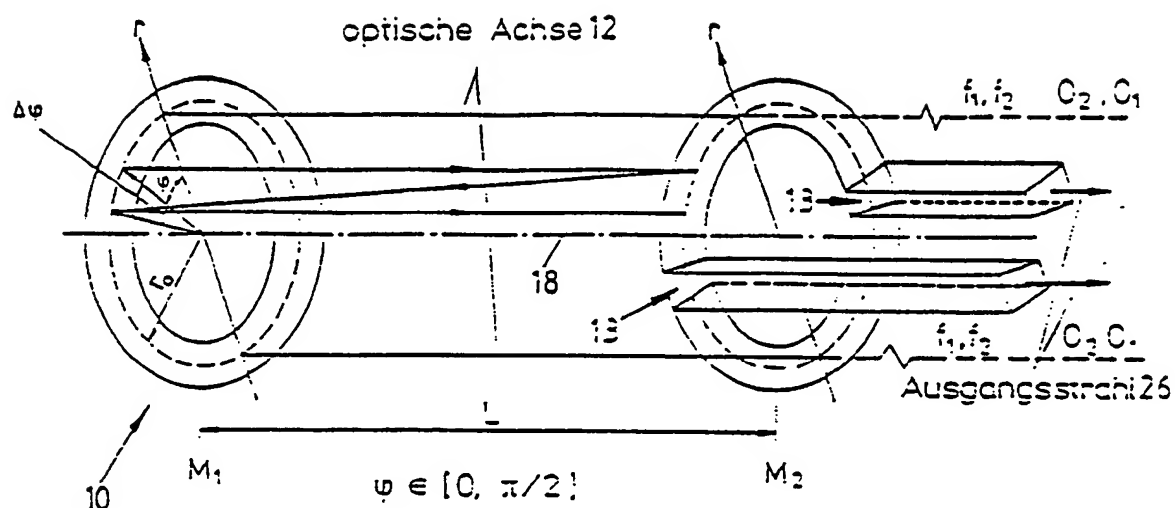
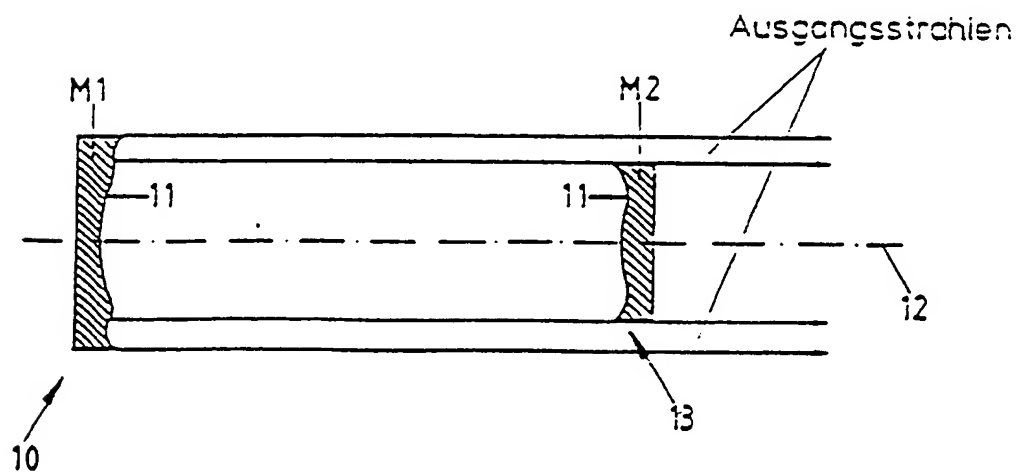


FIG. 8



6/8

FIG. 9a

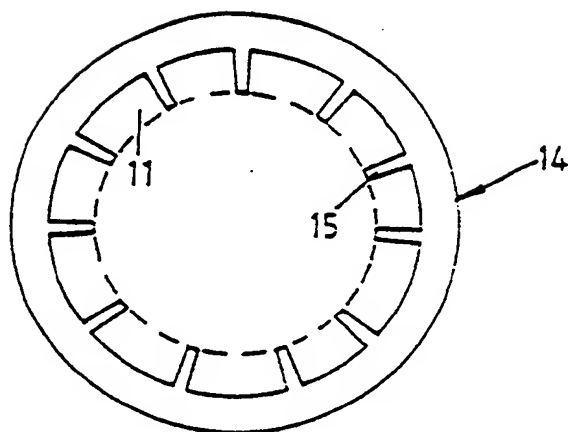


FIG. 9b

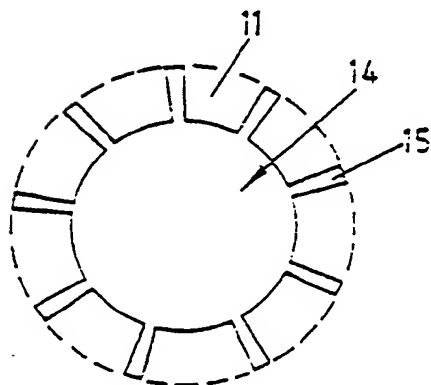
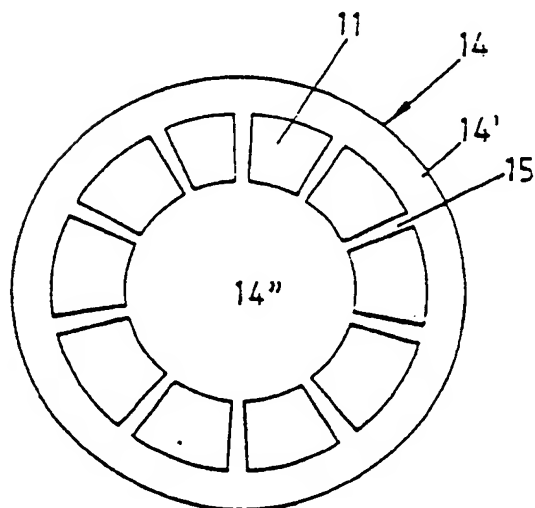


FIG. 9c



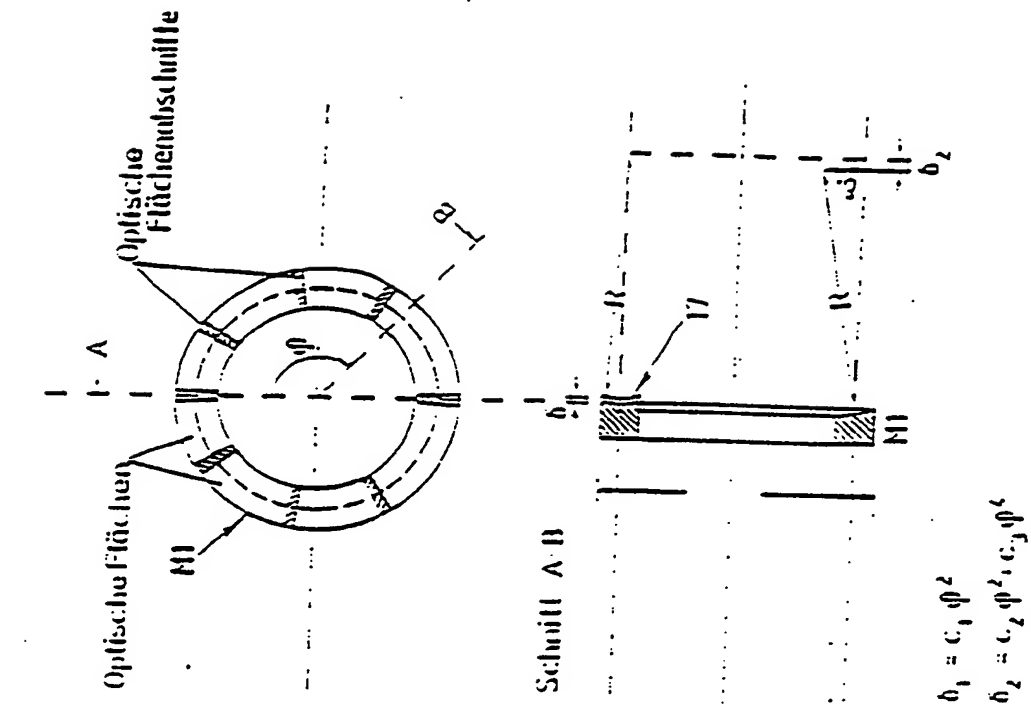


FIG. 10

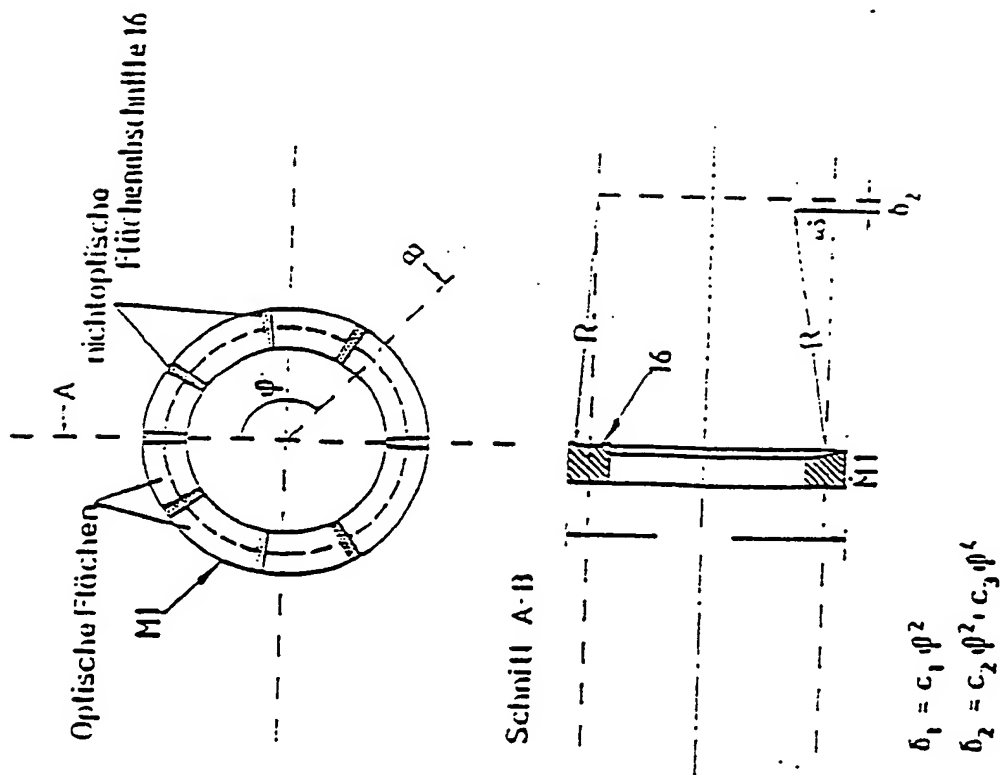
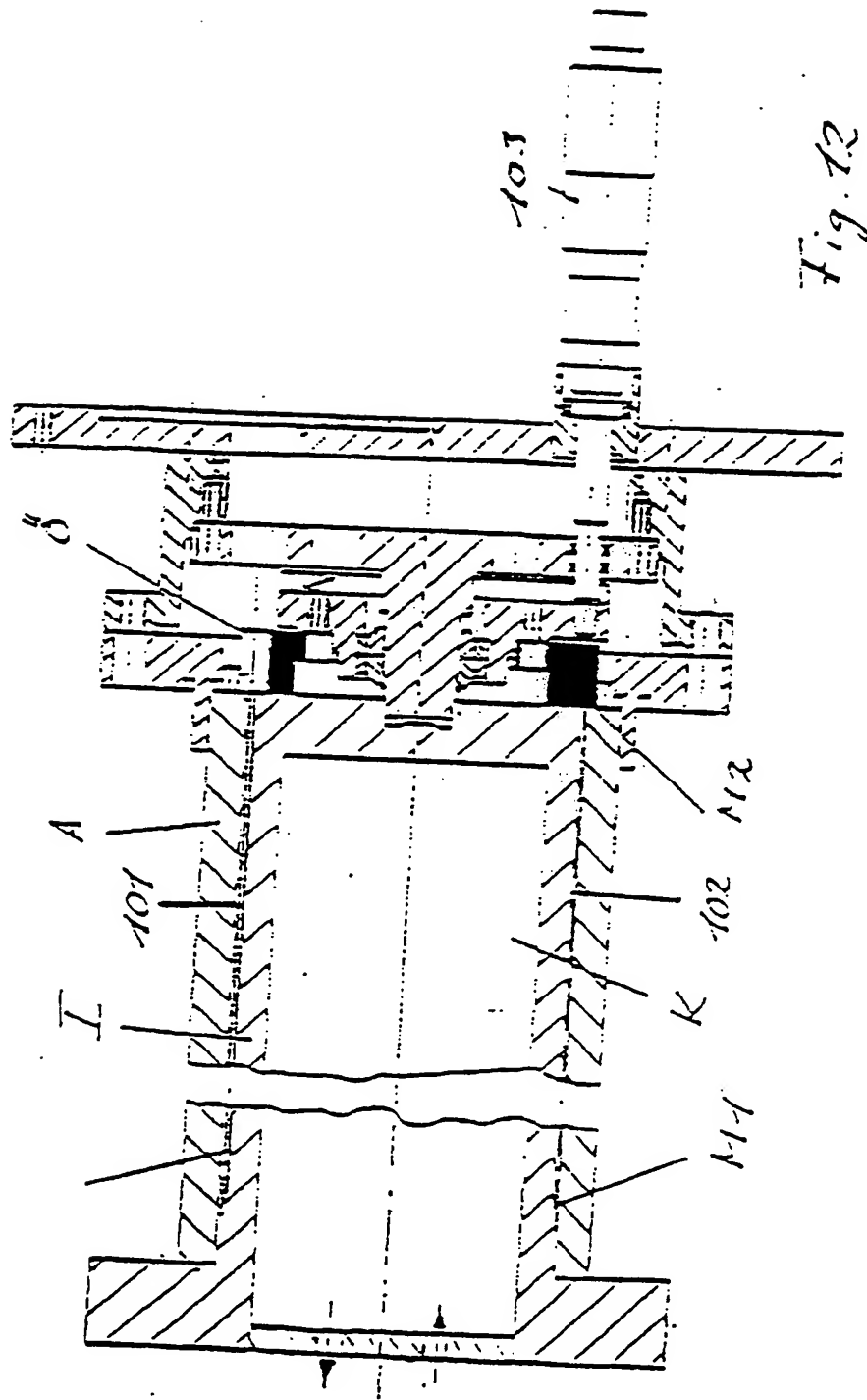


FIG. 11



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No **PCT/DE 91/00568**

I. CLASSIFICATION F SUBJECT MATTER (if several classification symbols apply, indicate all) *		
According to International Patent Classification (IPC) or to both National Classification and IPC		
Int.Cl. 5	H01S3/08	
II. FIELDS SEARCHED		
Minimum Documentation Searched ⁷		
Classification System		Classification Symbols
Int.Cl. 5	H01S	
Documentation Searched other than Minimum Documentation to the Extent that such Documents are included in the Fields Searched *		
III. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT ³		
Category *	Citation of Document, ¹¹ with indication, where appropriate, of the relevant passages ¹²	Relevant to Claim No. ¹³
A	DE,A,3 546 152 (GUGG) (cited in the application) see column 4, last paragraph - column 5, paragraph 1; figure 4 ---	1,2,10
A	OPTICS COMMUNICATIONS. Bd. 31, No. 2, November 1979, AMSTERDAM NL pages 193 - 196; O.L.BOURNE ET AL.: "A novel stable-unstable resonator for beam control of rare-gas halide lasers" see page 194, left-hand column, paragraph 1 - paragraph 2; figure 1 ---	1,3,10
A	EP,A,355 758 (DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR LUFT-UND RAUMFAHRT) see column 6, line 16 - column 7, line 45; figure 1 ---	1-4
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>* Special categories of cited documents: ¹⁰</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step</p> <p>"Y" document of particular relevance: the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.</p> <p>"Δ" document member of the same patent family</p> </div> </div>		
IV. CERTIFICATION		
Date of the Actual Completion of the International Search		Date of Mailing of this International Search Report
01 October 1991 (01.10.1991)		16 October 1991 (16.10.1991)
International Searching Authority		Signature of Authorized Officer
EUROPEAN PATENT OFFICE		

III. EINSCHLAGIGE VERÖFFENTLICHUNGEN (Fortsetzung von Blatt 2)		
Art °	Kennzeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der maßgeblichen Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	<p>EP, A, 339 128 (W.C. HERAEUS)</p> <p>& DE, A, 3 813 951 (W.C. HERAEUS)</p> <p>in der Anmeldung erwähnt</p> <p>siehe Spalte 3, Absatz 2 - Absatz 3; Abbildungen 1, 3, 4</p> <p>---</p>	<p>1-3,</p> <p>10-14</p>

ANNEX TO THE INTERNATIONAL SEARCH REPORT ON INTERNATIONAL PATENT APPLICATION NO.

DE 9100568
SA 48935

This annex lists the patent family members relating to the patent documents cited in the above-mentioned international search report.
The members are as contained in the European Patent Office EDP file on
The European Patent Office is in no way liable for these particulars which are merely given for the purpose of information.

01/10/91

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE-A-3546152	02-07-87	None	
EP-A-355758	28-02-90	DE-A- 3828951 US-A- 4961201	01-03-90 02-10-90
EP-A-339128	02-11-89	DE-A- 3813951 DE-U- 8816615 JP-A- 2012982 US-A- 4872179	09-11-89 01-03-90 17-01-90 03-10-89

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT⁷

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 91/00568

I. KLASSEIFIKATION DES ANMELDUNGSGEGENSTANDS (bei mehreren Klassifikationssymbolen sind alle anzugeben) ⁶		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
Int.Kl. 5 H01S3/08		
II. RECHERCHIERTE SACHGEBIETE		
Recherchiertes Mindestprüfstoff ⁷		
Klassifikationssystem	Klassifikationssymbole	
Int.Kl. 5	H01S	
Recherchierte nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Sachgebiete fallen ⁸		
III. EINSCHLAGIGE VERÖFFENTLICHUNGEN⁹		
Art. ⁹	Kennzeichnung der Veröffentlichung ¹¹ , soweit erforderlich unter Angabe der maßgeblichen Teile ¹²	Betr. Anspruch Nr. ¹³
A	DE,A,3 546 152 (GUGG) in der Anmeldung erwähnt siehe Spalte 4, letzter Absatz - Spalte 5, Absatz 1; Abbildung 4	1, 2, 10
A	OPTICS COMMUNICATIONS. Bd. 31, Nr. 2, November 1979, AMSTERDAM NL Seiten 193 - 196; O.L.BOURNE ET AL.: 'A novel stable-unstable resonator for beam control of rare-gas halide lasers' siehe Seite 194, linke Spalte, Absatz 1 - Absatz 2; Abbildung 1	1, 3, 10
A	EP,A,355 758 (DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT) siehe Spalte 6, Zeile 16 - Spalte 7, Zeile 45; Abbildung 1	1-4
<p>¹⁰ Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen:</p> <p>"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist</p> <p>"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie angeführt)</p> <p>"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht</p> <p>"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist</p> <p>"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist</p> <p>"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden</p> <p>"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist</p> <p>"A" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist</p>		
IV. BESCHIEDNIGUNG		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Abschließendes Datum des internationalen Recherchenberichts	
01.OCTOBER 1991	6. 10. 91	
Internationale Recherchenbehörde	Unterschrift des Bevollmächtigten Bediensteten	
EUROPAISCHES PATENTAMT	WONGEL H. <i>N. Wongel</i>	

III. D DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT (CONTINUED FROM THE SECOND SHEET)

Category *	Citation of Document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to Claim No
A	EP,A,339 128 (W.C.HERAEUS) & DE,A,3 813 951 (W.C.HERAEUS) (cited in the application) see column 3, paragraph 2 - paragraph 3; figures 1,3,4	1-3, 10-14

ANHANG ZUM INTERNATIONALEN RECHERCHENBERICHT ÜBER DIE INTERNATIONALE PATENTANMELDUNG NR.

DE 9100568
SA 48935

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten internationalen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

01/10/91

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE-A-3546152	02-07-87	Keine	
EP-A-355758	28-02-90	DE-A- 3828951 US-A- 4961201	01-03-90 02-10-90
EP-A-339128	02-11-89	DE-A- 3813951 DE-U- 8816615 JP-A- 2012982 US-A- 4872179	09-11-89 01-03-90 17-01-90 03-10-89

EPO FORM P003

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82